

- (71) Patent owner:
LaVision GmbH, 37081 Göttingen, DE
- (74) Representatives:
Walther, Walther & Hinz, 34130 Kassel,
- (72) Inventor:
Wieneke, Bernhard, 37085 Göttingen, DE
- (56) State of the art:
DE 199 28 698 A1
DE 198 01 615 A1
- (54) Title: **Method of determining the imaging equation for self calibration with regard to performing stereo-PIV methods**
- (57) The subject matter of the invention is a method for determining the imaging equation for self calibration with regard to performing stereo-PIV methods on visualized flows, said method being comprised of at least two cameras and one image sector, with the cameras viewing approximately the same area of the illuminated section but from different directions, the point correspondences between the two cameras being determined by measuring the displacement of the respective interrogation areas in the camera images using optical cross-correlation, the imaging equation being determined by means of approximation methods, using known internal and external camera parameters.



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 103 12 696 B3 2004.12.23

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: 103 12 696.1
(22) Anmeldetag: 21.03.2003
(43) Offenlegungstag: –
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 23.12.2004

(51) Int Cl.⁷: G01P 5/26
G01P 5/22

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden.

(71) Patentinhaber:
LaVision GmbH, 37081 Göttingen, DE

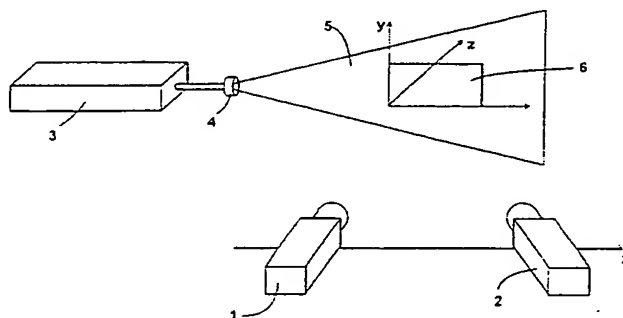
(72) Erfinder:
Wieneke, Bernhard, 37085 Göttingen, DE

(74) Vertreter:
Walther, Walther & Hinz, 34130 Kassel

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
DE 199 28 698 A1
DE 198 01 615 A1

(54) Bezeichnung: Verfahren zur Bestimmung der Abbildungsgleichung für die Selbstkalibrierung in Bezug auf die Durchführung von Stereo-PIV-Verfahren

(57) Zusammenfassung: Gegenstand der Erfindung ist ein Verfahren zur Bestimmung der Abbildungsgleichung für die Selbstkalibrierung in Bezug auf die Durchführung von Stereo-PIV-Verfahren bei visualisierten Strömungen, umfassend mindestens zwei Kameras und einen Bildausschnitt, wobei die Kameras in etwa den gleichen Bereich des Lichtschnittes, aber aus unterschiedlichen Richtungen betrachten, wobei die Ermittlung der Punktkorrespondenzen zwischen den zwei Kameras durch Messung der Verschiebung der jeweiligen Interrogationsfelder in den Kamerabildern mittels optischer Kreuzkorrelation erfolgt, wobei mit Hilfe bekannter interner und externer Kameraparameter mittels Näherungsverfahren die Abbildungsgleichung ermittelt wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Abbildungsgleichung für die Selbstkalibrierung in Bezug auf die Durchführung von Stereo-PIV-Verfahren.

Stand der Technik

[0002] Zunächst einmal ist zu erklären, was unter einem PIV-Verfahren zu verstehen ist. PIV ist die Abkürzung für Particle Image Velocimetry. Mit Hilfe des PIV können die Strömungsverhältnisse eines Gases oder eines Fluids in einem Raum dargestellt werden (z. B. DE 199 28 698 A1). Zur Durchführung eines solchen PIV-Verfahrens ist zunächst einmal ein Laser oder eine andere geeignete Lichtquelle erforderlich, die im Fluss eines Mediums, z. B. eines Gases oder einer Flüssigkeit, einen sogenannten Lichtschnitt erzeugt, wobei dieser Lichtschnitt durch mindestens eine Kamera betrachtet wird. Mit nur einer Kamera, die senkrecht auf den Lichtschnitt ausgerichtet ist, können die beiden Geschwindigkeitskomponenten in der Lichtebeine bestimmt werden, während mit mindestens zwei Kameras (Stereo-PIV), die den Lichtschnitt aus unterschiedlichen Winkeln beobachten, alle drei Komponenten bestimmt werden. Der Sinn des PIV-Verfahrens liegt, wie bereits erläutert darin, zwei- und dreidimensionale Geschwindigkeitsfelder zu vermessen; um die Geschwindigkeit des solchen Mediums in einem Raum zu visualisieren, werden der Flüssigkeit oder dem Gas kleine Partikel zugegeben, die dem Fluss unmittelbar folgen. Zur Durchführung dieses Stereo-PIV-Verfahrens ist es erforderlich, dass zunächst eine Kalibrierung stattfindet, was bedeutet, dass die Position der Kameras zur Lichtschnittebene bestimmt wird, was schlussendlich durch die Ermittlung der Abbildungsgleichung

$$\begin{pmatrix} x_1, y_1 \\ x_2, y_2 \end{pmatrix} = M(x, y, z)$$

erfolgt, wobei x_i, y_i die Bildkoordinaten eines Raumpunktes (x, y, z) im Bild der Kamera 1 und 2 (siehe Fig. 1) darstellen. Üblicherweise wird das Koordinatensystem so festgelegt, dass die Lichtschnittebene einem konstanten z (z. B. $z = 0$) entspricht. Als Abbildungsfunktion M wird oft das Lochkameramodell genommen, bei dem die Abbildung durch externe Parameter – Orientierung und Position der Kameras zueinander und zum Lichtschnitt – sowie interne Kameraparameter – u. a. durch den Abstand des Kamera-Chips zur imaginären Lochblende (Bildweite) und durch den Fußpunkt (Hauptpunkt) der optischen Hauptsachse auf dem Kamera-Chip – bestimmt wird. Mit Hilfe weniger zusätzlicher Verzerrungsparameter ist es möglich, die Abbildung mit einer Genauigkeit von besser als 0,1 Pixel zu bestimmen. Die Kalibrierung erfolgt nach dem Stand der Technik mit Hilfe einer sogenannten Kalibrierplatte, die von den beiden Kameras an einer oder mehreren Positionen in dem

Raum aufgenommen wird, wovon eine Position genau der Lichtschnittebene entsprechen muss.

[0003] Die Abbildungsgleichung kann nun zum Einen mit Hilfe der Kalibrierplatte und der Kenntnis der absoluten Position der beiden Kameras im Raum erfolgen, oder aber mit Hilfe der Kalibrierplatte, dem Winkel und der Orientierung der Kameras zur Kalibrierplatte und dem Abstand der Kameras zur Kalibrierplatte, oder aber mit Hilfe einer Kalibrierplatte, die durch die Kameras an zwei oder mehr z -Positionen erfasst wird.

[0004] Bekannt ist ebenfalls die Verwendung einer sogenannten dreidimensionalen Kalibrierplatte zur Ermittlung der Abbildungsgleichung, wobei eine derartige dreidimensionale Kalibrierplatte z. B. zwei Ebenen aufweist, wobei eine jede Ebene mit einem Raster von z. B. 10×10 Markierungen in einem festen Abstand versehen ist. Diese bekannten Methoden der Kalibrierung haben verschiedene Nachteile. So ist es erforderlich, dass die Kalibrierplatte an der selben Stelle und exakt parallel zum Licht stehend dort positioniert werden muss. Dies ist sehr aufwendig zu realisieren; selbst kleine Abweichungen von $0,6^\circ$ bedeuten am Bildrand eine Positionsungenauigkeit von 10 Pixel bei der Vektorbestimmung in den zwei Bildausschnitten, die bei starken Geschwindigkeitsgradienten zu Fehlern im hohen Prozentbereich führen können. Der Aufwand für die Kalibrierung ist hoch. Bei großen Beobachtungsfeldern müssen entsprechend große Kalibrierplatten gefertigt werden, die eventuell noch um einen exakten Betrag in Z -Richtung gleichmäßig verschoben werden müssen. Oder es ist eine Winkelbestimmung bzw. auch eine Abstandsbestimmung erforderlich, was ebenfalls aufwendig und fehlerbehaftet ist. Es ist z. B. schwierig, bei der Abstandsbestimmung die Strecke zwischen einem Nullpunkt auf der Kalibrierplatte und einer imaginären Kameralochposition zu bestimmen. Diese jedoch liegt bei üblichen Objektiven mit Mehrfachlinsen an einer bestimmten Stelle im Objektiv. Bei der Kalibrierung bzw. bei der Durchführung des PIV-Verfahrens in geschlossenen Räumen, z. B. innerhalb eines Rohres, ist es erforderlich, einen Zugang zu dem Rohr zu schaffen, um die Kalibrierplatte in dem Raum platzieren zu können. Gleichzeitig muss sichergestellt sein, dass die Kalibrierung unter ähnlichen optischen Bedingungen wie die Messung erfolgt, d. h. es muss eventuell die Kalibrierung mit der gleichen Flüssigkeit und unter denselben Bedingungen in einem Rohr erfolgen, bei denen auch später die Messung erfolgt.

[0005] Bei vielen Objekten, wie z. B. in Mikrokanälen, ist eine sogenannte in-situ-Kalibrierung gar nicht oder nur mit erheblichem Aufwand zu realisieren, eben weil es überaus schwierig ist, die Kalibrierplatte dort unterzubringen.

[0006] Aus denselben oder ähnlichen Gründen wurden deshalb im Bereich des Computersehens und der Fotogrammetrie verschiedene Verfahren entwickelt, ohne Kalibrierhilfen zu einer genügend genauen Abbildungsgleichung zu gelangen. Dieses als Selbstkalibrierung bezeichnete Verfahren basiert darauf, dass in zwei Kamerabildern gleiche Punkte gefunden werden, sogenannte Punktkorrespondenzen, die zu dem selben Raumpunkt gehören. Bei Kenntnis genügend vieler Punktkorrespondenzen, einer vollständigen oder teilweisen Kenntnis der individuellen internen Kameraparameter und der Kenntnis einer absoluten Skalierung ist es dann möglich, die obige Abbildungsgleichung zu bestimmen, d. h. die restlichen internen Kameraparameter sowie die Orientierung und den Abstand der Kameras zueinander. Dieses Verfahren ist allerdings ohne Weiteres nicht auf das Stereo-PIV-Verfahren anwendbar, da es teilweise schwierig ist, die Punktkorrespondenzen zwischen den Kameras zu bestimmen. Dies liegt daran, dass nicht eine feste Oberfläche mit einer festen Struktur betrachtet wird, sondern sich bewegende Teilchen in einem durch einen Lichtschnitt gegebenen Volumen.

[0007] Des Weiteren ist aus der DE 198 01 615 A1 ein Kalibrierverfahren für Laserlichtschnittverfahren bekannt, wobei eine Kalibrierung der Auswerteeinheit durch einen quantitativen Vergleich eines von der Kamera im Strömungsobjekt aufgenommenen Bildes mit einem Abbildungsmaßstab mit einem außerhalb des Strömungsobjektes aufgenommenen Bildes mit einem weiteren Abbildungsmaßstab erfolgt. Nachteilig hierbei ist, dass die Kameras bei diesem Verfahren sehr schnell bewegt werden müssen.

Aufgabenstellung

[0008] Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, eine Möglichkeit zur Kalibrierung von Stereo-PIV-Verfahren aufzuzeigen, die die oben beschriebenen Nachteile vermeidet, d. h. der Aufwand zur Kalibrierung soll gering sein und die Kalibrierung soll auch in geschlossenen Räumen bzw. auch in Mikrokanälen durchzuführen sein.

[0009] Die Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass das Verfahren zur Bestimmung der Abbildungsgleichung für die Selbstkalibrierung in Bezug auf die Durchführung von Stereo-PIV-Verfahren bei visualisierten Strömungen mindestens zwei Kameras und einen Lichtschnitt umfasst, wobei die Kameras in etwa den gleichen Bereich des Lichtschnittes, aber aus unterschiedlichen Richtungen betrachten, wobei die Ermittlung der Punktkorrespondenzen zwischen den mindestens zwei Kameras durch Messung der Verschiebung der jeweiligen Interrogationsfelder in den Kamerabildern mittels optischer Kreuzkorrelation erfolgt, wobei mit Hilfe bekannter interner und externer Kameraparameter mittels Näherungsverfahren

die Abbildungsgleichung ermittelt wird. Wesentlich bei dem erfindungsgemäßen Verfahren ist nunmehr die Ermittlung der oben beschriebenen Punktkorrespondenzen zwischen den mindestens zwei Kameras. Die Ermittlung der Punktkorrespondenzen erfolgt – wie bereits ausgeführt – durch die sogenannte optische Kreuzkorrelation. Bei der optischen Kreuzkorrelation wird ein Kamerabild zu einem bestimmten Zeitpunkt t von einer Kamera aufgenommen, wobei das gleiche Kamerabild von der zweiten Kamera zum gleichen Zeitpunkt t aus einer anderen Richtung aufgenommen wird. Das heißt, die Kamerabilder zeigen jeweils den gleichen Ausschnitt, aber aufgrund der Optik der betrachtenden Kameras erscheinen die Bilder relativ zueinander verschoben, verdreht oder verzerrt. Um das Maß für die Verschiebung der Kamerabilder zu bestimmen, wird ein jedes einzelne Kamerabild in einzelne Abschnitte unterteilt, sogenannte Interrogationsfelder. Das heißt, dass ein Kamerabild, z. B. aus 20×20 Interrogationsfeldern besteht. Nun wird ein Interrogationsfeld aus dem ersten Kamerabild bestimmt, und das entsprechende korrelierende Interrogationsfeld aus dem zweiten Kamerabild. Der Abstand des Interrogationsfeldes des ersten Kamerabildes zu dem Interrogationsfeld des zweiten Bildausschnittes bildet dann das Maß für die Verschiebung der betrachteten Kamerabilder durch die Kameraoptik. Dieses Maß für den Abstand bildet schlussendlich den höchsten Korrelationspeak in der zweidimensionalen Korrelationsfunktion (dx, dy) , wobei die Position dieses Peaks im Korrelationsfeld die Position der jeweiligen Kamera $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ wiedergibt. Damit ergibt sich für jedes Interrogationsfeld eine Punktkorrelation $x_1, y_1 \leftrightarrow x_2, y_2$. Üblicherweise wird die zweidimensionale Korrelationsfunktion (dx, dy) zwischen den beiden Interrogationsfeldern mit Hilfe einer schnellen digitalen Fouriertransformation berechnet (Wiener-Kinchin Theorem).

[0010] Dann können mit Hilfe eines oder mehrerer interner Kameraparameter, mit Hilfe der Punktkorrespondenzen und einer absoluten Längenskalierung die übrigen internen und externen Kameraparameter bestimmt werden, wobei die komplette Abbildungsgleichung mit einem Näherungsverfahren, beispielsweise mit Hilfe des Levenberg-Marquardt-Algorithmus ermittelt wird.

[0011] In einem zweiten typischen Fall, in dem eine Kalibrierung schon erfolgt ist, also die internen und externen Parameter der Abbildung schon erkannt sind, aber wobei die Lage des Lichtschnittes im Raum noch unbekannt ist, kann mit Hilfe der Punktkorrespondenzen die Lage des einen Lichtschnittes oder der beiden Lichtschnitte der beiden Laser im Raum durch übliche Triangulationsverfahren ermittelt werden.

[0012] Es besteht nun immer die Gefahr, dass die Punktkorrespondenzen fehlerhaft ermittelt wurden.

Das heißt, dass die einzelnen Interrogationsfelder des einen Kamerabildes nicht zu denen des anderen Kamerabildes passen. Mit Hilfe des bekannten RANSAC-Verfahrens können diese fehlerhaften Punktkorrespondenzen eliminiert werden, und zwar dadurch, dass dieses RANSAC-Verfahren als Algorithmus dem eigentlichen Näherungsverfahren aufgesetzt wird.

[0013] Da nicht eine feste Oberfläche, sondern Teilchen in einem Volumen definiert durch den Lichtschnitt beobachtet werden, erscheinen Teilchenanordnungen von der einen Kamera gesehen unter Umständen gravierend anders als von der anderen Kamera betrachtet, da die Teilchen im Raum – Tiefe des Lichtschnitts – angeordnet sind. Die Kreuzkorrelation zwischen den beiden Kamerabildern ist daher sehr fehleranfällig, da der korrekte Korrelationspeak stark verschmiert ist und oft niedriger als ein zufälliger Rauschpeak ist und daher nicht erkannt wird. Diese Fehlermöglichkeit wird in vorteilhafter Weise dadurch behoben, dass zu aufeinanderfolgenden Zeiten t_0 bis t_n jeweils zwei oder mehr Kamerabilder der mindestens zwei Kameras aufgenommen werden, wobei zu jedem Zeitpunkt t_0 bis t_n mit Hilfe dieser Bilder die zweidimensionale Korrelationsfunktion $c_0(dx, dy)$ bis $c_n(dx, dy)$ mittels der optischen Kreuzkorrelation ermittelt wird, wobei die Korrelationsfunktionen c_0 bis c_n aufsummiert werden, und wobei dann nach Ermittlung des höchsten Korrelationspeaks die Verschiebung dx, dy der jeweiligen Interrogationsfelder und damit die Punktkorrespondenzen ermittelt werden.

[0014] Anhand der Zeichnungen wird die Erfindung nachstehend beispielhaft näher erläutert.

[0015] Fig. 1 zeigt einen typische Stereo-PIV-Aufbau;

[0016] Fig. 2 zeigt schematisch die Entstehung von Korrelationsfeldern aus der Kreuzkorrelation von Kamera 1 und 2;

[0017] Fig. 3 zeigt die bei Fig. 2 entstehenden Korrelationsfelder aus dem ersten Laser (links) und dem zweiten Laser (rechts);

[0018] Fig. 4 zeigt den Verschiebungsvektor berechnet aus der Position des höchsten Korrelationspeaks vergrößert um einen bestimmten Faktor zur besseren Visualisierung.

Beispiel 1

[0019] Es wird ein üblicher Stereo-PIV-Aufbau mit zwei Kameras (Fig. 1 und 2) zu Grunde gelegt, bei dem die Kameras entlang der x-Achse positionierbar sind und unter einem Winkel von typischerweise 30–50° von beiden Seiten auf die Lichtsnittebene ausgerichtet sind, wobei die Lichtsnittebene durch

die x-y-Ebene bei $z = 0$ definiert ist. Beide Kameras liegen damit bei $z = -Z_{cam}$. Die optischen Hauptachsen der Kameras sind koplanar und liegen in einer gemeinsamen x-y-Ebene. Zwei gepulste Laser 3 erzeugen kurz nacheinander mit Hilfe einer Lichtschnittoptik 4 an derselben Position den Lichtschnitt 5, wobei die beiden Kameras zwei Bilder 6 kurz hintereinander aufnehmen, in jedem Bild einen Laserpuls.

[0020] Es wird in diesem Beispiel davon ausgegangen, dass eine Volumenkalibrierung unabhängig vom eigentlichen Lichtschnitt bereits erfolgt ist, indem z. B. eine 3D-Kalibrierplatte von beiden Kameras simultan aufgenommen wurde. Damit sind alle internen und externen Abbildungsparameter relativ zu einem Koordinatensystem basierend auf der Position der Kalibrierplatte bekannt.

[0021] Mit Hilfe der optischen Kreuzkorrelation zwischen bei der eigentlichen Messung simultan aufgenommenen Teilchenbildern wird bei Mittelung über Korrelationsfelder, die zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen werden, ein summiertes Korrelationsfeld für jedes Interrogationsfenster (Fig. 3, Nr. 1), ermittelt und aus der Position des höchsten Korrelationspeaks (Fig. 3, Nr. 2 – entspricht einem Pfeil in Bild 3) ergeben sich damit die Punktkorrespondenzen zwischen Kamera 1 und 2 (Bild 4). Der Fußpunkt der Pfeile zeigt die Position eines Interrogationsfensters im Bild von Kamera 1, und der Endpunkt zeigt den korrespondierenden Punkt im Bild von Kamera 2, wobei Fußpunkt und Endpunkt zusammen eine Punktkorrespondenz bilden.

[0022] Aus den Punktkorrespondenzen wird dann mit Hilfe der bekannten Abbildungsgleichung mittels Triangulation die absolute Lage des Lichtschnitts im Raum bestimmt und durch eine geeignete Koordinatentransformation die Lichtsnittebene als $z = 0$ definiert. Damit ist die Abbildung für die Lichtsnittebene bestimmt und kann für die eigentliche Stereo-PIV-Auswertung benutzt werden. Der Vorteil von diesem Verfahren liegt darin, dass die Kalibrierplatte nicht genau auf die Lichtsnittebene positioniert werden muss, sondern irgendwo im Raum, und trotzdem eine hochgenaue Kalibrierung auf die Lichtsnittebene berechnet werden kann.

[0023] Zusätzlich ergibt sich aus der Breite des Korrelationspeaks (Fig. 3, Nr. 3) und einem leicht zu errechnenden geometrischen Faktor direkt die Dicke des Lichtschnitts. Fig. 3 links zeigt die Korrelationsfelder von Laser 1 und Fig. 3 rechts die von Laser 2. Aus der relativen Lage der beiden Lichtschnitte im Raum und ihrer Dicke ergibt sich damit, inwieweit die beiden Lichtschnitte sich überlappen und für die PIV-Messung geeignet sind.

Beispiel 2

[0024] Es wird der gleiche Versuchsaufbau wie bei Beispiel 1 vorausgesetzt. Zugleich wird angenommen, dass das Kameraobjektiv in einem Winkel zur Kameraebene steht, um die Scheimflugbedingung zu erfüllen, damit alle Teilchen in der Lichtschnittebene im Fokus sind. In diesem Beispiel steht allerdings keine vorherige Kalibrierung zur Verfügung, sondern aus den Punktkorrespondenzen selbst soll eine Abbildungsgleichung bestimmt werden.

[0025] Dies geschieht durch ein direktes Näherungsverfahren, bei dem die fehlenden Abbildungsparameter gefittet werden. Da es zu viele freie Parameter gibt, müssen bestimmte Annahmen gemacht werden, um zu einer Lösung zu konvergieren. Dazu gibt es verschiedene Möglichkeiten mit Hilfe von bekannten Umständen, um die Anzahl der freien Parameter zu reduzieren:

Es wird angenommen, dass aus einer vorherigen Kalibrierung des Scheimflugadapters, die nur einmal durchzuführen ist, bekannt ist, wie sich der Hauptpunkt als Funktion des Winkels verschiebt oder die Scheimflugbedingung wird direkt aus der Geometrie berechnet. Damit braucht der Hauptpunkt nicht mitgefittet zu werden, sondern ist eine Funktion der externen Beobachtungswinkel, die gefittet werden.

[0026] Ebenso wird mit der Bildweite verfahren. Die Bildweite wird dabei aus der Linsengleichung $1/B + 1/G = 1/f$ berechnet, mit B = Bildweite, G = Gegenstandswert und f = bekannte Brennweite des Kameraobjektives. Während des Näherungsverfahrens wird damit die Brennweite als Funktion der Gegenstandsweite berechnet, wobei G als freier externer Parameter gefittet werden muss. Alternativ zur Linsengleichung kann man vorher für jede Kamera separat die Abhängigkeit der Bildweite von der Gegenstandsweite empirisch eichen.

[0027] Zusätzlich besteht die Möglichkeit die Anzahl der freien Parameter weiter zu reduzieren, indem man ausnutzt, dass die optischen Hauptachsen in diesem Fall koplanar sind.

[0028] Der Vorteil von diesem Verfahren ist, dass auf eine in-Situ Kalibrierung vollständig verzichtet werden kann, wobei sich die Abbildungsgleichung vollständig aus den berechneten Punktkorrespondenzen unter Annahme einiger bekannter Umstände berechnen lässt. Für den PIV-Anwender erleichtert sich damit der Messablauf erheblich.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der Abbildungsgleichung für die Selbstkalibrierung in Bezug auf die Durchführung von Stereo-PIV-Verfahren bei visualisierten Strömungen, umfassend mindestens zwei

Kameras und einen Bildausschnitt, wobei die Kameras in etwa den gleichen Bereich des Lichtschnittes, aber aus unterschiedlichen Richtungen betrachten, wobei die Ermittlung der Punktkorrespondenzen zwischen den zwei Kameras durch Messung der Verschiebung der jeweiligen Interrogationsfelder in den Kamerabildern mittels optischer Kreuzkorrelation erfolgt, wobei mit Hilfe bekannter interner und externer Kameraparameter mittels Näherungsverfahren die Abbildungsgleichung ermittelt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die internen Kameraparameter die Brennweite, Lage der optischen Achsen (x_0 , y_0) und Verzerrungsparameter der Kameraoptik beinhalten.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die externen Parameter die Lagen und Orientierung der Kameras zueinander beinhalten.

4. Verfahren nach einem oder mehrere der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei unbekannter Lage des Lichtschnittes relativ zum Koordinatensystem einer bekannten Abbildungsgleichung die Lage des Lichtschnittes mit Hilfe der Punktkorrespondenzen bestimmt wird.

5. Verfahren nach einem oder mehrere der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei Kenntnis eines oder mehrerer interner Kameraparameter mit Hilfe der Punktkorrespondenzen und einer absoluten Längenskalierung die übrigen internen und externen Kameraparameter bestimmbar sind, um so die Abbildungsgleichung zu ermitteln.

6. Verfahren nach einem oder mehrere der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass bei aufeinanderfolgenden Zeiten t_0 bis t_n jeweils zwei oder mehr Kamerabilder der mindestens zwei Kameras aufgenommen werden, wobei zu jedem Zeitpunkt t_0 bis t_n mit Hilfe dieser Bilder die zweidimensionale Korrelationsfunktion $c_0(dx, dy)$ bis $c_n(dx, dy)$ mittels der optischen Kreuzkorrelation ermittelt wird, wobei die Korrelationsfunktionen c_0 bis c_n aufsummiert werden, und wobei dann nach Ermittlung des höchsten Korrelationspeaks die Verschiebung dx , dy der jeweiligen Interrogationsfelder und damit die Punktkorrespondenzen ermittelt werden.

7. Verfahren nach einem oder mehrere der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Näherungsverfahren auf dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus aufbaut.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus der RANSAC-Algorithmus aufgesetzt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass durch jede Kamera zwei Bilder kurz

nacheinander aufgenommen werden und mit Hilfe einer Kreuzkorrelation zwischen den Bildern zum Zeitpunkt t und $t + dt$ zusätzliche Punktkorrespondenzen bestimmt werden.

10. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die optischen Achsen von mindestens zwei Kameras koplanar zueinander angeordnet sind.

11. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Breite des Korrelationspeaks und einen geometrischen Faktor die Lichtschnittdicke der beiden Lichtschnitte bestimmt wird und damit zusammen mit der Position der Lichtschnitte im Raum genau bestimmt werden kann, inwieweit die Lichtschnitte überlappen und für eine Stereo-PIV-Messung geeignet sind.

12. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass unter der Annahme einer Fokussierung auf die Teilchen im Lichtschnitt beim Näherungsverfahren die Bildweite als Funktion der Brennweite des Objektivs und des Abstandes des Lichtschnitts von der Kamera berechnet wird und damit nicht mehr gefittet werden muss.

13. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass bei Verwendung eines Scheimflugadapters unter der Annahme einer optimalen Einstellung des Scheimflugadapters beim Näherungsverfahren der Winkel zwischen Kamerachip und Hauptachse und die Lage des Hauptpunktes auf dem Kamerachip aus den externen Abbildungsparametern berechnet wird und damit nicht mehr gefittet werden müssen.

14. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Breite des Korrelationspeaks und durch die Abbildungsgeometrie die Lichtschnittdicke der beiden Lichtschnitte bestimmt wird und damit zusammen mit der Position der Lichtschnitte im Raum genau bestimmt werden kann, inwieweit die Lichtschnitte überlappen und für eine Stereo-PIV-Messung geeignet sind.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

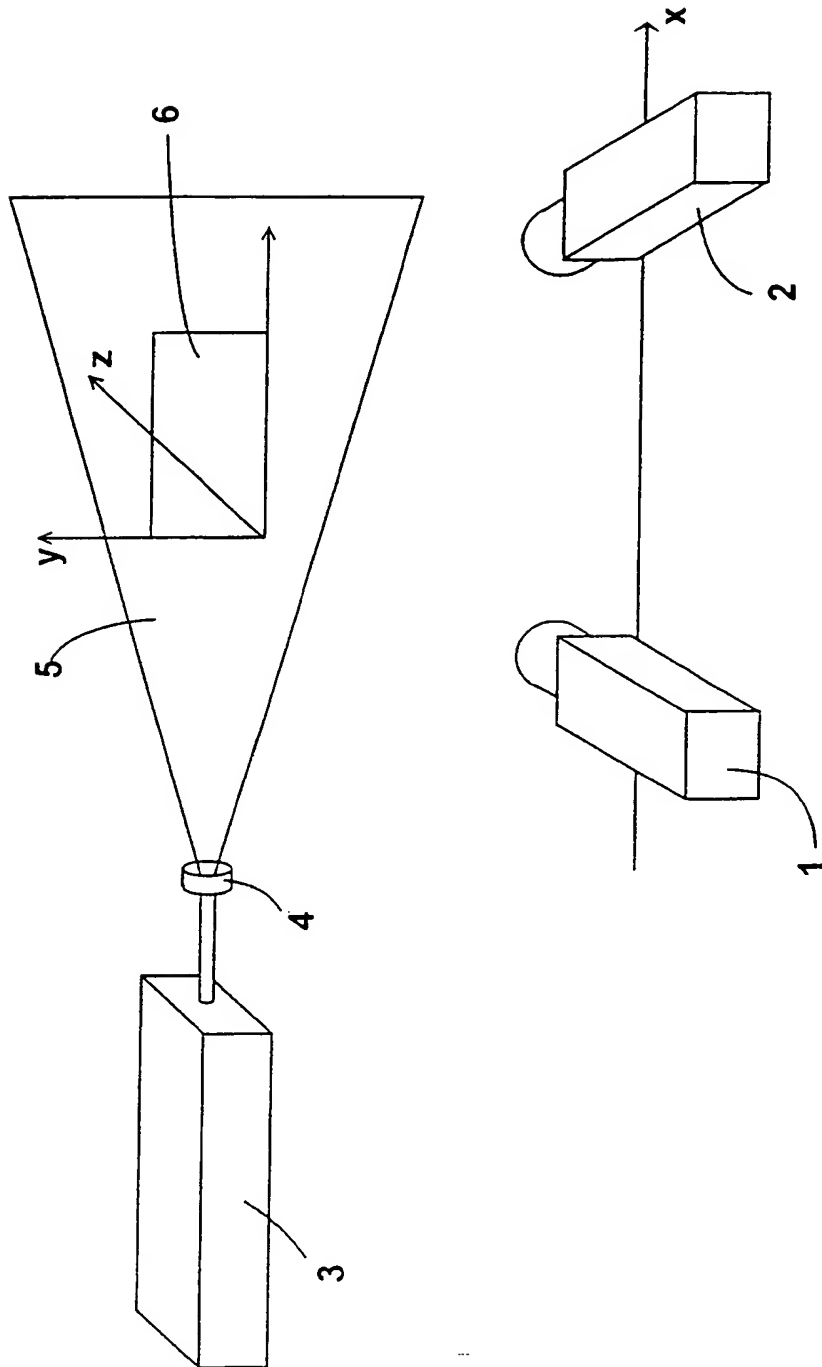


Fig. 1

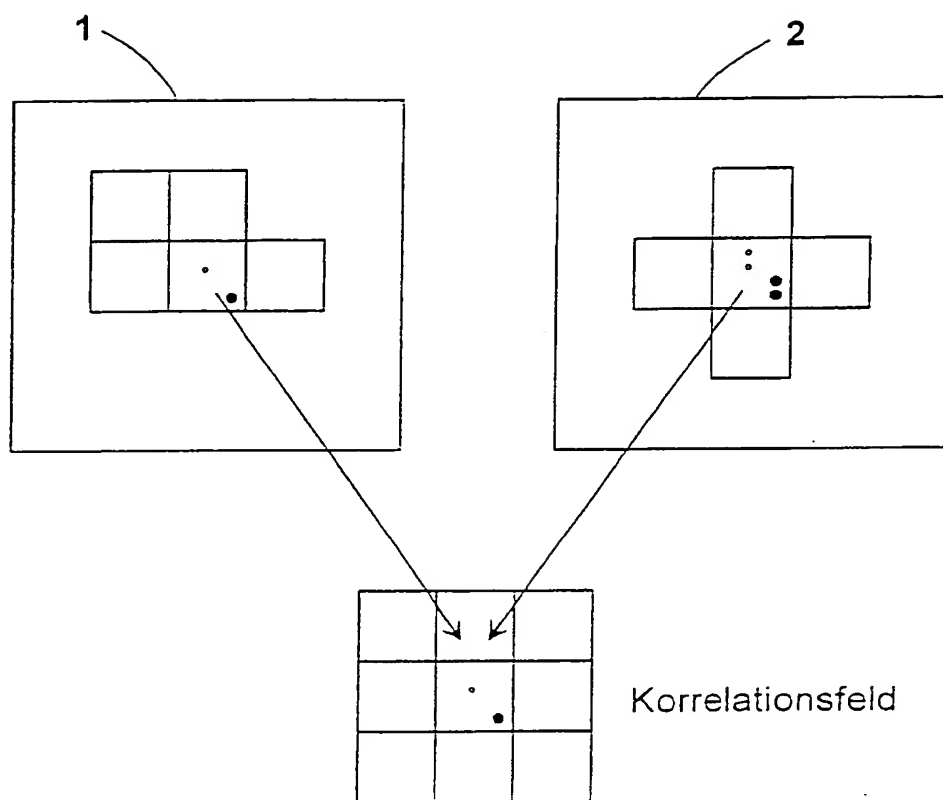


Fig. 2

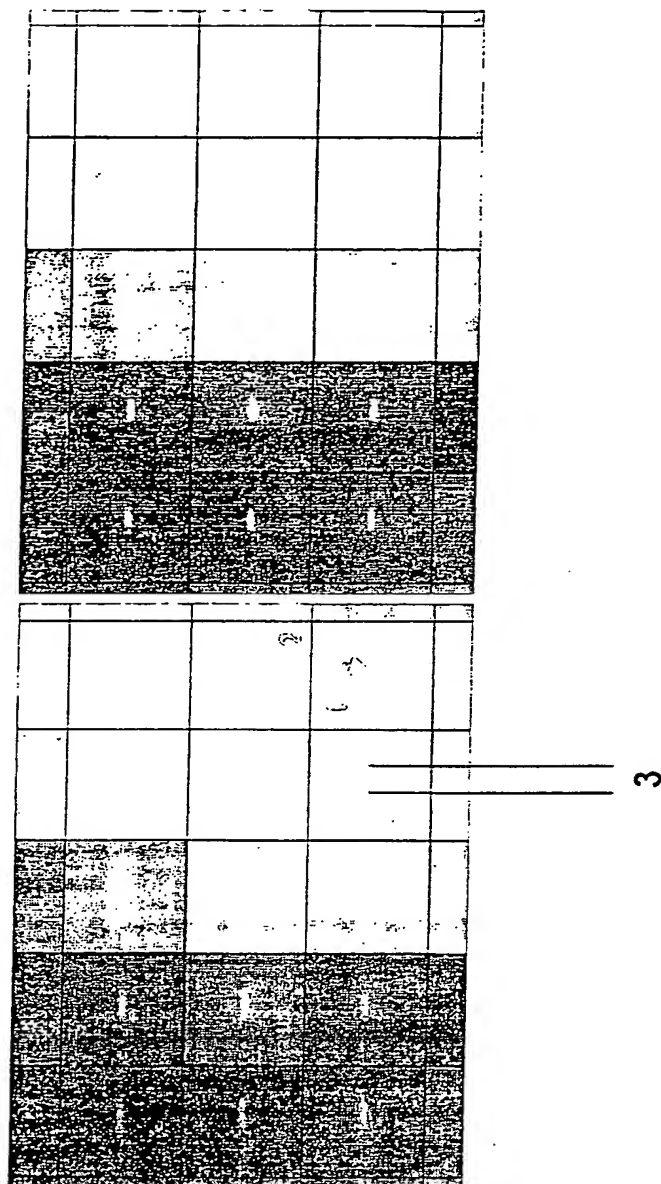


Fig. 3

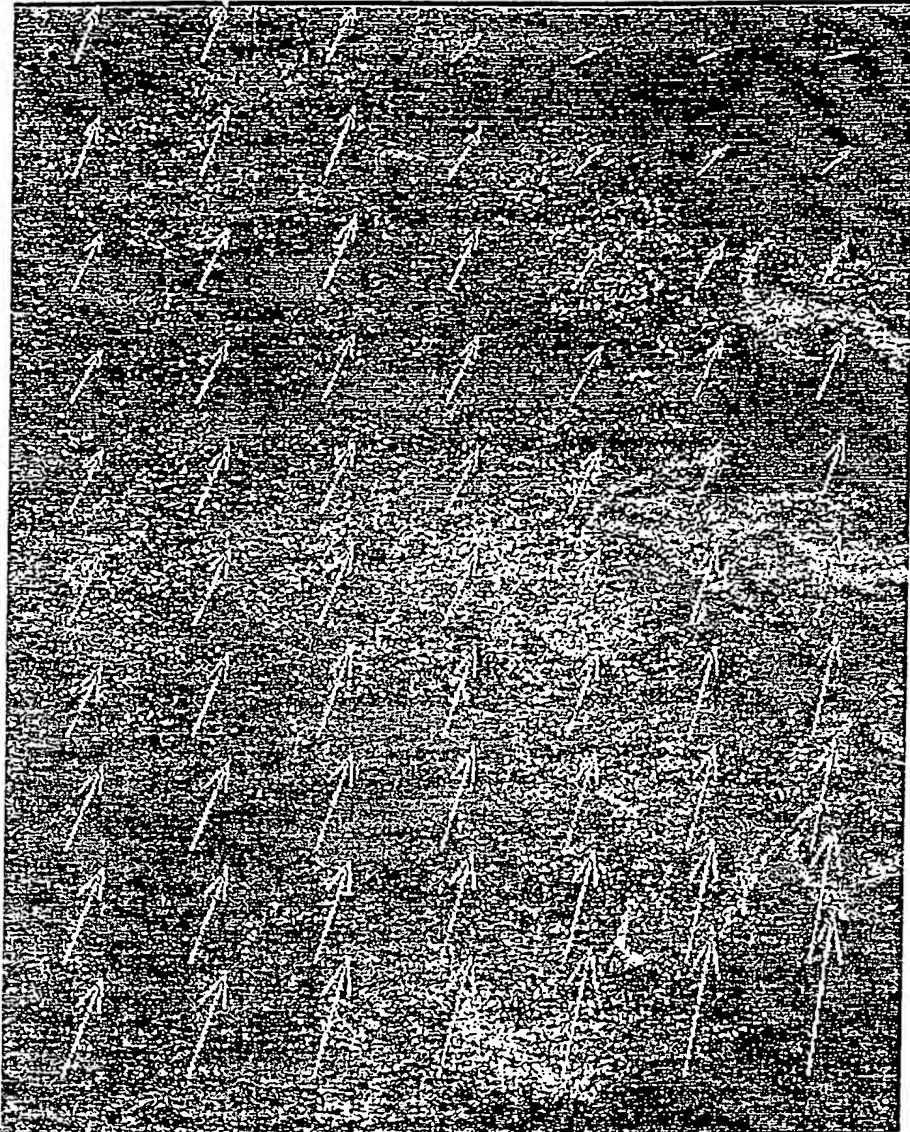


Fig. 4